文章编号:1000-4939(2022)06-1096-13

低温下饱水粉砂岩的动态力学特性及本构模型研究

翁磊[1,2,3],张皓量[1],张勇[2,3],储昭飞[1,2,3],徐翔宇[1]

(1. 武汉大学土木建筑工程学院,430072 武汉;2. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,102200 北京;
3. 北京低碳清洁能源研究院,102200 北京)

摘　要:寒区工程岩体常常受到动力荷载以及低温联合作用的影响,研究低温条件下岩石的动态力学响应对于寒区岩土工程建设有着十分重要的意义。围绕低温岩石动力学特性及损伤机理等问题,首先将饱水粉砂岩试样冻结至不同的负温水平(−10 ~ −50 ℃),然后采用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统对低温饱水试样开展动力冲击试验,研究不同低温和不同应变率下饱水粉砂岩试样的变形特征和动力学性能演变规律,最后基于 Z-W-T 非线性黏弹性模型构建了考虑应变率和低温效应的冻结粉砂岩动态本构模型。结果表明:试样的裂纹闭合应变随着应变率的增加而增大,而弹性应变和塑性应变随应变率没有明显变化规律;动态弹性模量和压缩强度随着温度的下降呈现先增大后减小的趋势,且在 −30 ℃达到最大值;冻结岩石力学性能取决于其内部的水、冰混合物含量以及由此产生的弱化和强化联合作用;提出的考虑应变率和低温效应的动态本构模型可以较好地拟合应变率下(大于 150 s^{-1})冻结粉砂岩的全阶段应力应变关系。

关键词:岩石动力学;负温;本构模型;应变率;水、冰含量

中图分类号:TK529　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.010

Dynamic mechanical properties and the constitutive models of the water-saturated siltstones under frozen conditions

WENG Lei[1,2,3],ZHANG Haoliang[1],ZHANG Yong[2,3],CHU Zhaofei[1,2,3],XU Xiangyu[1]

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, 430072 Wuhan, China; 2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., 102200 Beijing, China; 3. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, 102200 Beijing, China)

Abstract: Rock mass in cold regions is often affected by the combined effects of dynamic loading and low temperature; therefore, it is of great importance to study the dynamic mechanical response of rocks under low temperature conditions for geotechnical construction in cold regions. First, the water-saturated siltstone specimens were frozen to different negative temperature levels (from −10 ℃ to −50 ℃), and then dynamic impact tests were carried out on the water-saturated specimens at low temperatures using the split

收稿日期:2022-08-22　　**修回日期:**2022-10-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52004182;52278412);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金资助项目(No. GJNY-21-41-14;WPUKFJJ2019-05)
通信作者:翁磊。E-mail:leiweng@whu.edu.cn
引用格式:翁磊,张皓量,张勇,等. 低温下饱水粉砂岩的动态力学特性及本构模型研究[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1096-1107,1134.
WENG Lei, ZHANG Haoliang, ZHANG Yong, et al. Dynamic mechanical properties and the constitutive models of the water-saturated siltstones under frozen conditions[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(6):1096-1107,1134.

Hopkinson pressure bar (SHPB) system to study the changes in the deformation characteristics and mechanical properties. Finally, the dynamic constitutive model of frozen siltstone considering the strain rate and low temperature effect was established. The results show that the crack closure strain of the specimen increases with the increase of strain rate, while the elastic strain and plastic strain do not change significantly with the strain rate. The dynamic elastic modulus and compressive strength show a trend of increase and then decrease with the decrease of the sub-zero temperature, and reach the maximum value at −30 ℃. The mechanical properties of frozen rocks depend on the content of water/ice mixture inside the frozen siltstones and the resulting combined weakening and strengthening effects. The proposed constitutive model considering the strain rate and low temperature effects can better fit the full stress-strain relationship of frozen siltstone strain rate ($>150\ s^{-1}$).

Key words: rock dynamics; sub-zero temperature; constitutive model; strain rate; ice/water content

随着“一带一路”战略构想的深入实施，我国西北地区一大批重点岩土工程项目已经开建或者即将上马。这些地区的气候以严寒为主要特征，年最低温度低至 −41.5 ℃，且据统计，一年中有超过 3 个月以上的时间气温长期处于 −20 ℃ 以下。处于高寒地区的岩体不可避免地遭受极端低温引发的冻胀损伤作用，给岩土工程基础设施的建设和维护以及岩体的稳定性等带来巨大挑战。例如，在反复冻融作用下，沉积岩、变质岩乃至岩浆岩都会发生不同程度的物理力学性质劣化。迄今，学者们开展了大量关于岩石冻融循环下劣化损伤的试验研究。已有研究结果表明，循环冻融作用下岩石试样的单轴压缩强度、抗拉强度、点荷载强度以及弹性模量等均随着冻融循环次数的增加呈现相似的衰减规律。这些力学参数均由常温下的室内试验得到，然而，相比常温条件，岩石在负温条件下会表现出显著不同的力学行为。

关于岩石在冻结状态下的力学和变形特征，Inada和 Yokata[1] 对花岗岩和安山岩冻结至最低 −160 ℃开展了压缩和拉伸试验，结果表明随着温度的降低，试样的压缩强度和拉伸强度均升高。Aoki 等[2] 发现在 −160 ℃左右，不同类型岩石试样的单轴压缩强度相比其常温状态下增加了 20% ~ 70%，巴西劈裂强度增加了 50% ~100%，杨氏模量增加了约 20%。Yamabe 和 Neaupane[3] 发现当温度从 20 ℃下降到 −10 ℃时，试样的单轴压缩强度和杨氏模量呈现增加趋势，而随着温度从 −10 ℃继续下降到 −20 ℃时，其杨氏模量几乎没有变化。Dwidedi 等[4] 进一步研究了断裂韧度与低温的相关性，发现断裂韧度随温度降低而增大。徐光苗等[5] 证实红砂岩、页岩的抗压强度、弹性模量均随温度的减小而增大，且红砂岩对温度变化更敏感。唐明明等[6] 研究了 −10 ℃ ~ −50 ℃温度范围内花岗岩的单轴、三轴变形破坏及力学特性。奚家米等[7] 研究了饱水砂质泥岩试样的三轴力学特性参数与温度的变化关系，结果表明其抗压强度、内摩擦角、黏聚力以及弹性模量等均随温度的降低而增大，围压对冻结岩石力学特性的影响规律基本与常规试验条件下的规律一致。此外，单仁亮等[8] 开展了低温下三轴力学试验，结果表明花岗岩试样的三轴压缩强度和黏聚力均随温度的下降而增大。除了温度效应外，影响低温条件下岩石物理力学性质变化的另一个因素是岩石的初始含水量。Chen 等[9] 和 Huang 等[10] 指出，水的存在对岩石完整性和抵抗变形的能力有弱化作用，而冰的存在则一定程度上增加了岩石致密性从而提高其强度。当水和冰共同存在于岩石的孔隙中时，岩石的力学特性变得非常复杂，取决于水的弱化作用大于还是小于冰的强化作用。这也是导致岩石力学性质在低温下有不同变化规律的原因[11]。例如，Kurilko 和 Novopashin 发现当温度从 20 ℃ 下降到 −5 ℃时，Kimberlite 试样的单轴压缩强度下降了 49%，然而当温度继续从 −5 ℃下降到 −50 ℃时，试样的强度出现明显增加，甚至超过室温下的强度。Zakharov 和 Kurilko[12] 也得到类似的试验结果。然而，Huang 等[13] 发现当试样暴露在 −195.8 ℃的液氮中后，矿物颗粒的晶界处产生大量微裂纹，从而导致试样的拉伸强度和压缩强度减小。以上研究均表明低温下岩石的物理力学性质受到水、冰弱化与强化效应的联合作用[14-15]。然而，岩石在低温下变得更弱还是更强这一问题依然难以确定，低温下水、冰-岩石相互作用机理有待进一步揭示。

上述研究主要关注冻结岩石在准静态条件下的

力学行为。例如,单轴、三轴以及巴西劈裂试验的应变率均非常低,约为 $10^{-4}\ s^{-1}$。大量研究表明岩石在动荷载下的力学性质包括单轴压缩强度、巴西劈裂强度和杨氏模量等均与其在静态加载条件下的力学性质有显著差别[16-18]。并且,我国东北或者西北地区某些特殊的岩土工程包括钻孔、掘进隧道和采矿等,岩石均不可避免地受到低温及动载荷联合作用的影响。因此,研究岩石在低温条件下的动态力学响应显得尤为重要,对寒区岩体工程项目有着重要意义。Yang 等[19-20]研究了冻结状态下的红砂岩、大理岩和花岗岩的动态力学性能随应变率的变化规律,同时也探究了低温下岩石冲击破碎后分形维数及断口形貌特征。赵涛[21]开展了冻结裂隙岩石试样的冲击动力响应研究,揭示了岩石冻结强化效应的宏-细观机制。然而,关于低温下岩石的动态响应研究仍较少,特别是不同低温下冻结岩石动态力学特性的弱化和强化机理需深入研究。

另一方面,作为岩石力学研究领域的关键问题,岩石的本构关系一直以来是研究中的热点问题。然而,对于冻结岩石而言,其本构关系受到多方面因素(如低温、含水率等)的影响,大大增加了冻结岩石本构模型的构建难度[22-23],特别是动态荷载作用下冻结岩石的本构模型更加复杂。目前,针对冻土在高应变率的动态本构关系研究,已有部分研究成果,如刘志杰等[24]开展了应变率为 400 ~ 800 s^{-1} 的 SHPB 冲击力学试验,在此基础上建立了冻土的线性黏弹性动态本构关系;马冬冬[25]对人工冻土试样开展了一系列动静组合加载试验,建立了综合考虑轴压、围压、低温以及应变率效应的人工冻土动态本构模型。然而,针对冻结岩石的动态本构模型研究还相对较少[26]。

本研究首先将饱水粉砂岩试样分别冻结至不同负温水平,包括 -10 ℃、-20 ℃、-30 ℃、-40 ℃和 -50 ℃。然后,针对不同负温条件下的试样进行不同应变率下的 SHPB 动力冲击试验,深入研究低温和应变率对冻结粉砂岩的变形特性、动态弹性模量和动态压缩强度的影响规律,讨论低温下饱水粉砂岩试样的水、冰弱化与强化机理。最后,基于 Z-W-T 非线性黏弹性本构模型,考虑损伤因子和低温效应,建立能同时考虑应变率及冻结温度影响的冻结岩石动态本构模型,对比结果表明该模型可以很好地表征冻结岩石的动态应力应变关系。

1 试验材料与试验方案

1.1 粉砂岩试样准备

本研究的粉砂岩取自甘肃省东南部的秦岭地区,该粉砂岩主要包含石英(45.21%)、长石(39.83%)、方解石(6.48%)以及少量黏土矿物(8.48%)。由薄片分析结果表明该粉砂岩为粗颗粒粉砂岩,其颗粒尺寸主要分布在 7.7 ~ 434.8 μm 之间,平均颗粒尺寸为 77.9 μm。为减少试样本身的差异性对试验结果产生的误差,粉砂岩试样取自于同一个岩块且按照相同方向进行取芯制样。为获得饱水粉砂岩试样,首先将试样放入 -0.1 MPa 负压环境中干抽 6 h,然后加水浸泡继续抽真空 6 h,最后将试样完全浸泡至水中至少 72 h。对干燥和饱水粉砂岩试样分别进行了基本力学性能测试,表 1 汇总了其基本物理力学性质。可以看到,饱水岩石试样的 P 波波速大约是干燥岩石试样 P 波波速的 1.03 倍,这主要是因为饱水后试样中的孔隙被水分填充,减少了 P 波在孔隙-岩石界面的散射。饱水粉砂岩试样的力学性质,如单轴抗压强度、抗拉强度和弹性模量等均比干燥粉砂岩试样的力学性质低。造成这种现象主要归结于 2 种机理:①由于水与黏土矿物间的物理化学反应,导致矿物间的黏结变弱;②由于水岩相互作用导致初始微裂纹的摩擦效应变小。

表 1 干燥和饱水粉砂岩的基本物理力学参数

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of the dry and saturated sandstone

参数	干燥状态	饱水状态
密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 426	2 499
饱和含水量/%	-	3.01
P 波波速/($m \cdot s^{-1}$)	2 437	3 165
单轴抗压强度/MPa	71.26	46.89
弹性模量/GPa	12.67	10.31
泊松比	0.37	0.45
抗拉强度/MPa	3.27	2.75

1.2 负温环境下岩石动态压缩试验

采用霍普金森压杆(SHPB)试验系统开展动态

压缩试验。该系统主要由气罐、发射子弹、入射杆、透射杆和吸收杆组成。子弹和弹性杆均由高强度 Cr40 钢材料制作而成，直径为 50 mm，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3。入射杆和透射杆的中间位置按照径向对称布置的方式在弹性杆表面分别粘贴了一对应变片，以便记录弹性杆中的动态应变，用于应力波数据处理，如图 1 所示。

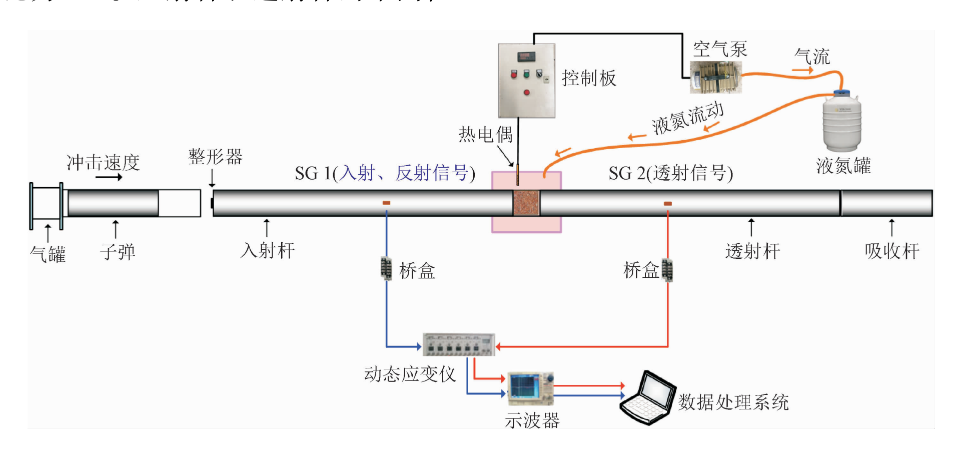


图 1　SHPB 试验系统及低温子系统构成

Fig. 1　Configuration of the SHPB system integrated with the cryogenic sub-system

根据一维应力波理论，动态应力波在试样两端的界面经历多次反射和透射后会趋于应力平衡状态，即试样入射端的动应力等于透射端的动应力。当动应力在试样两端实现应力平衡后，可根据三波法计算得到岩石试样的应变率、应变以及应力，即

$$\dot{\varepsilon}(t)=\frac{C_b}{L_s}[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)] \tag{1}$$

$$\varepsilon(t)=\int_0^t\dot{\varepsilon}(t)\mathrm{d}t=\frac{C_b}{L_s}\int_0^t[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_r(t)-\varepsilon_t(t)]\mathrm{d}t \tag{2}$$

$$\sigma(t)=\frac{E_bA_b}{2A_s}[\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)+\varepsilon_t(t)] \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_i(t)$，$\varepsilon_r(t)$ 和 $\varepsilon_t(t)$ 分别为入射应变、反射应变和透射应变；C_b 为 P 波在弹性杆中的波速；A_s 为试样的截面积；L_s 为试样的高度；E_b 为弹性杆的弹性模量；A_b 为弹性杆的截面积。

为了对负温下岩石试样进行动力学测试，采用一套低温系统可使测试时试样所处的环境温度达到并保持在预设负温水平。低温系统由环境箱、液氮罐、空气泵、控制器和热电偶组成（图 1）。液氮气流在空气泵作用下缓慢进入环境箱中，使得环境箱温度下降，从而降低试样的温度。一旦热电偶监测到环境温度达到预设的温度值，空气泵将在电磁阀的控制下自动停止工作。同时，当环境温度高于预设负温水平，空气泵可以重新启动工作。通过这种方式，试验过程中的环境温度可以连续保持在预设温度水平。

本研究主要关注影响饱水粉砂岩动力响应的两个影响因素，即应变率和低温水平。通过调整发射气压值可使子弹产生不同的初始撞击速度，从而产生不同的加载应变率。对于低温效应，本研究考虑了 5 个负温梯度，即 −10 ℃、−20 ℃、−30 ℃、−40 ℃和 −50 ℃。作为参考组，同时也开展了常温下（18 ℃）饱水岩石的动力冲击试验。

1.3　动态应力平衡验证

根据一维应力波理论，动力学测试的必要前提在于试样破坏前达到动态应力平衡状态。为此，波形整形器被广泛应用于 SHPB 动力学测试中用以调节入射波波形，使入射波的波头平缓上升，从而更易于达到应力平衡。经过多次试冲测试，将真空封泥压制成厚度为 1.5 mm、直径为 10 mm 的圆盘可以产生理想的入射波波形。入射波有一段相对平缓的加载段，持续时间约 120 μs，整个入射波持续时间约 300 μs。图 2 为应变 SG1 和 SG2 记录的电压信号。气压分别设定为 0.15 MPa、0.20 MPa、0.25 MPa、0.30 MPa 和 0.38 MPa，用以研究试样在不同应变率的动力响应特征。

为了定量校核 SHPB 测试的动态应力平衡状态，将试样入射端和透射端的应力波直接进行比较。引入动态应力平衡因子来估算入射端和透射端应力

波的差异,动态应力平衡因子用下式计算得到[27]

$$\eta = \frac{2[\sigma_i(t) + \sigma_r(t) - \sigma_t(t)]}{\sigma_i(t) + \sigma_r(t) + \sigma_t(t)} \tag{4}$$

式中 $\sigma_i(t)$,$\sigma_r(t)$和 $\sigma_t(t)$分别为入射应力、反射应力和透射应力。

图 3 为一次典型动力冲击压缩实验的应力平衡结果。结果表明应力平衡因子在 57 ~ 219 μs 时间段内近似为 0,表明这一段时间内试样基本处于动态应力平衡状态。从图 3 中可以看到,试样的破坏发生在应力平衡期间,再次证实了低温 SHPB 试验的有效性。试样的应变率由应变率时间曲线平台段(图 3c)的平均值获得,即时间 86 ~ 151 μs 之间的平均值 150.5 s^{-1}。因此,该试样的动态弹性模量为恒应变率段应力与应变的比值,即 16.0 GPa。

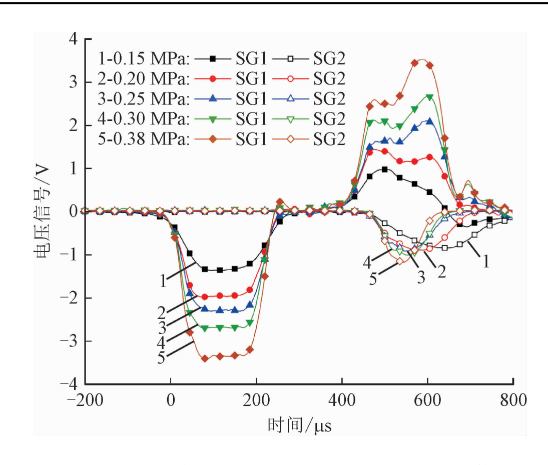


图 2 不同发射气压下 SG1 和 SG2 的电压信号(以 -10 ℃为例)

Fig. 2 Voltage signals recorded by SG1 and SG2 under different gas pressures (tested at -10 ℃)

(a) 应力波形

(b) 动态应力平衡因子检验

(c) 应变率-时间

(d) 加载率-时间

图 3 动态压缩试验应力平衡验证(气压 0.25 MPa,温度 -10 ℃)

Fig. 3 Verification of the stress equilibrium for the dynamic compression test at -10 ℃ and gas pressure of 0.25 MPa

2 试验结果与分析

2.1 动态应力应变曲线

图 4 给出了饱水岩石试样在室温、20 ℃及 -50 ℃下的动态应力应变曲线。从图 4 中可以看到,对于同一温度工况下,受到高加载应变率的试样表现出更高的峰值应变。根据峰后阶段曲线的不同,可以将应力应变曲线类型分为 2 类,即峰后应力回弹型和峰后应变软化型。较低的加载应变率会产生峰后应力回弹现象,如应变率为 69.6 s^{-1}时。这主要是

因为在动力加载阶段积累的弹性能得到释放，从而在入射杆中产生一个反向的压缩波。然而，在较高加载应变率下（如大于 123.9 s^{-1}），试样在应力波上升阶段就发生破坏，应力波的弹性能以动能和表面能等形式瞬间释放。因此，在高应变率下试样的峰后阶段表现为应变软化行为。

从图 4 中还可以看到，冻结粉砂岩的动态应力应变曲线可分成初始压密阶段、弹性阶段、损伤阶段和峰后阶段等 4 个阶段。初始压密阶段反映了试样初始裂纹的闭合，弹性阶段反映了试样的弹性参数，如弹性模量和弹性应变等。峰值应力前的损伤阶段则表示了试样在损伤破坏过程中的塑性/延性变形特征。为了更清楚地讨论压密变形、弹性变形、塑性变形等对总变形的贡献，将试样的应变分别按照裂纹闭合应变（ε_{cl}）、塑性应变（ε_p）和弹性应变（ε_e）进行分析。裂纹闭合应变取决于加载初期阶段初始裂纹的闭合或滑移，但不包含这一阶段的弹性变形，故裂纹闭合应变可通过弹性阶段斜率与应变坐标的交点值获得。弹性应变值为穿过峰值应力的弹性段在应变坐标轴上投影段的长度。塑性应变则是峰值应变减去裂纹闭合应变以及弹性应变。图 5 为动态应力应变曲线上获取上述 3 种应变值的示意图。

图 4　不同温度下粉砂岩试样的动态应力应变曲线

Fig. 4　Dynamic stress strain curves of siltstones under varying temperatures

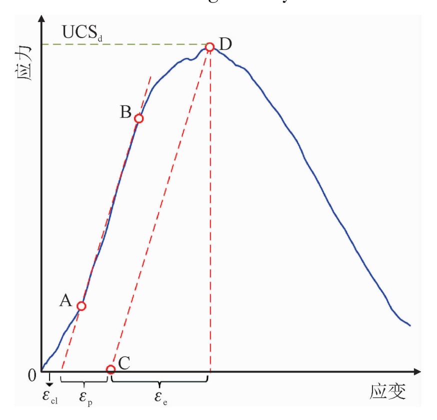


图 5　裂纹闭合应变、塑性应变和弹性应变

Fig. 5　Crack closure strain, plastic strain and elastic strain

图 6 为饱水试样裂纹闭合应变、塑性应变及弹性应变随温度和应变率的变化情况。可以看到，相同温度下，裂纹闭合应变随着应变率的增加而增大，而弹性应变和塑性应变随应变率没有表现出明显的变化规律。根据 Martino 等[28] 的研究结果，闭合应变和塑性应变的值在一定程度上共同决定了岩石脆性、延性变形特性。然而，仅从应变值来难以判断冻结岩石的脆性、延性变化情况，如下文将要讨论的，冻结岩石的脆性、延性特性还与其水、冰含量（即温度）有关。

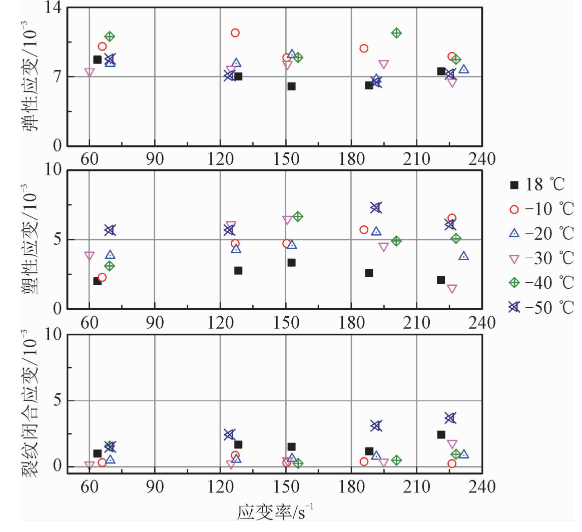


图 6　饱水粉砂岩 ε_{cl}，ε_p 以及 ε_e 随温度和应变率的变化

Fig. 6　Changes in ε_{cl}, ε_p and ε_e for the saturated siltstones against different strain rates and temperatures

2.2　低温及应变率影响下的动态弹性模量

作为岩石材料的重要力学参数，弹性模量表征了材料抵抗弹性变形的能力。本研究中，动态弹性模量为恒应变率加载段加载率与应变率的比值。图 7 给出了饱水试样的动态弹性模量（E_d）随温度和应

变率的变化情况。可以看到,对于每个负温水平下,E_d随着应变率的增加而单调递增。关于负温对动弹模的影响,随温度从 18 ℃ ~ −50 ℃变化时,试样的动态弹性模量先增加然后降低。具体来说,其变化趋势可分为 3 个阶段,即 18 ℃ ~ −10 ℃的缓慢增加阶段、−10 ℃ ~ −30 ℃的快速增加阶段和 −30 ℃ ~ −50 ℃的降低阶段。造成这一现象的原因在于,负温下饱水试样的变形特征受到冰的影响较大,冰的存在充填了初始孔隙,从而增加了试样的刚度。但是,当温度下降到 −40 ℃和 −50 ℃时,可以看到试样的动态弹性模量比 −30 ℃情况下的更低。这可能是由于超低温下的冻胀作用使微裂纹起裂扩展,导致岩石整体性下降。

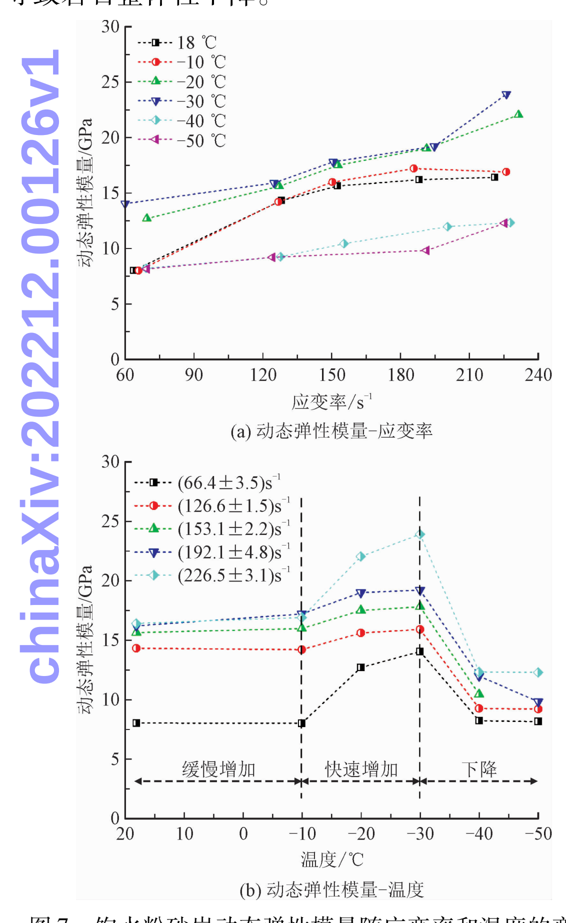


图 7　饱水粉砂岩动态弹性模量随应变率和温度的变化

Fig. 7　Changes in the dynamic elastic modulus of the saturated siltstones against strain rate and temperature

图 8(a)给出了不同负温条件下饱水试样的动态压缩强度(UCS_d)随应变率的变化情况。采用简单的指数函数可以对 UCS_d数据进行拟合,即

$$UCS_d(\dot{\varepsilon}) = a e^{b\dot{\varepsilon}} \tag{5}$$

式中 a、b 为拟合参数。根据式(5),图 8(a)给出了各工况下的拟合曲线,拟合参数见表 2。

表 2　不同温度下饱水粉砂岩动态压缩强度拟合公式的参数

Tab. 2　Fitting parameters for UCS_d of the saturated siltstones as a function of the strain rate

T/℃	a	b	相关系数
18	56.15	0.003 35	0.968
−10	82.36	0.002 32	0.852
−20	91.12	0.002 01	0.946
−30	94.76	0.001 95	0.904
−40	71.59	0.002 48	0.871
−50	65.71	0.002 75	0.934

可以看到,拟合公式的相关系数均超过 0.8,表明采用这一公式可以很好地拟合动态压缩强度随应变率变化的趋势。为了进一步讨论 UCS_d随测试温度的变化情况,图 8(b)给出了不同应变率下试样的 UCS_d随测试温度的变化情况。可以看到,随着温度从 18 ℃下降到 −50 ℃,UCS_d呈现先增加后减小的变化趋势,这与动态弹性模量的变化规律有些类似,且在 −30 ℃温度水平下试样的 UCS_d最大。

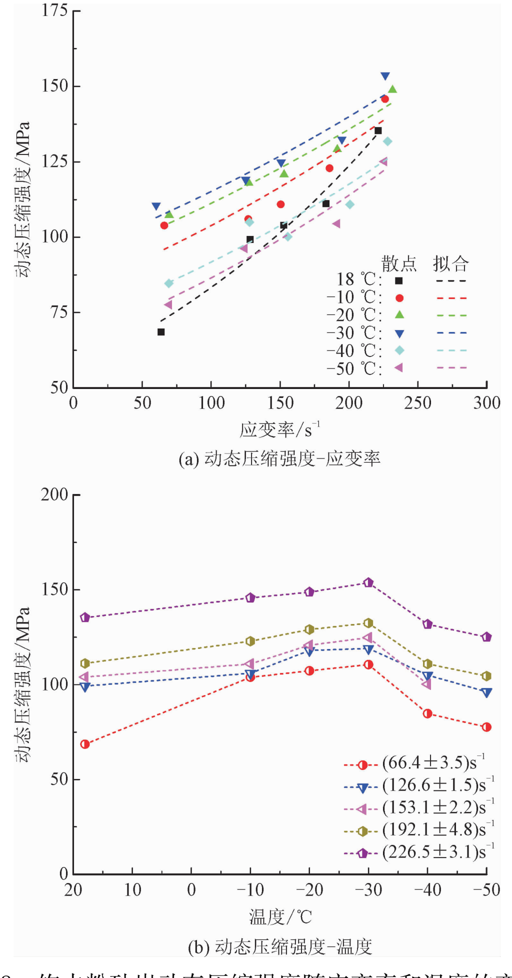


图 8　饱水粉砂岩动态压缩强度随应变率和温度的变化

Fig. 8　Changes in the dynamic compressive strength of the saturated siltstones against strain rate and temperature

2.3　负温下饱水粉砂岩的水、冰弱化与强化机理

以上试验结果表明随着温度的下降，UCS_d 和 E_d 呈现先增加然而降低的趋势。很多原因的综合作用导致这一结果，包括低温下矿物颗粒的收缩、冰强度的增加以及水、冰-岩石的相互作用等。具体而言，在温度 -10 ℃ ~ -30 ℃范围内，岩石材料颗粒收缩使得颗粒排列更紧密，从而使其宏观强度变大。随着温度的进一步下降，试样中的初始裂纹在矿物颗粒不均匀收缩作用下发生起裂扩展，如温度为 -30 ℃ ~ -50 ℃变化时，其动态压缩强度呈下降趋势。如 Ashworth 等[29]证实，孔隙水的冻结温度由于孔隙尺寸效应会显著下降，更小尺寸孔隙的水需要更低的冻结温度。当温度下降到 0 ℃以下时，有一部分孔隙中的水并未冻结成冰，导致水、冰与岩石发生混合作用。

为进一步说明阐述低温下岩石内部未冻水含量的演化特性，利用核磁共振技术对不同温度下（常温至 -50 ℃）冻结岩石试样开展核磁共振横向弛豫时间（T_2）谱测试[30-31]。具体地，首先将岩石冻结到不同的负温水平，然后在该温度下进行核磁共振测试。由于岩石本身和冰不会产生核磁信号，故测到的核磁信号强度可反映岩石中未冻水的含量。图 9 给出了不同负温下饱和试样的 NMR 信号与孔径的关系曲线。

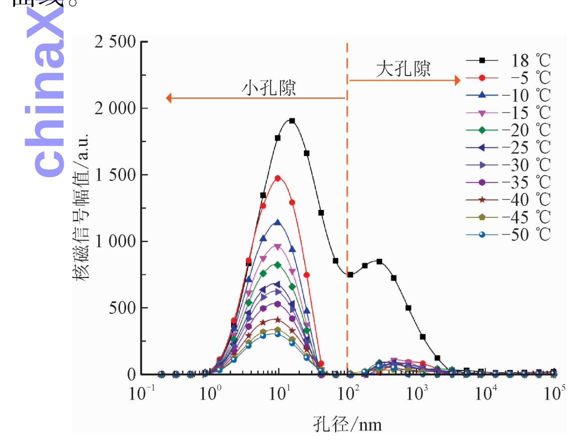


图 9　不同温度下饱水粉砂岩核磁信号幅值随孔径分布的变化曲线

Fig. 9　Curves of the NMR signal intensity against pore size of the saturated sandstones at different temperatures

根据 Tang 等[32]和 Weng 等[33]的方法，将孔径小于 100 nm 的孔隙分类为小孔隙，将孔径大于 100 nm 的孔隙分类为大孔隙。从图 9 中可以看到 NMR 信号曲线主要包含 2 个峰，从而可以区分大孔隙和小孔隙。随着温度从 18 ℃下降到 -50 ℃，对应小孔隙的信号强度的峰值大幅减小，表明小孔隙中的未冻结水含量减小。不同的是，对应大孔隙的信号强度仅在 18 ℃ ~ -5 ℃温度区间内有明显的下降，但在 -5 ℃ ~ -50 ℃负温区间内没有明显的下降或者上升趋势。这种现象表明在 -5 ℃时，大孔隙中的大部分水已经冻结成冰。然而，相比常温下，此温度下岩石表现出更高的强度和刚度。

图 10 给出了总水、冰含量随环境温度的变化情况。从图中可以很清楚地看到，当温度从 -5 ℃下降到 -50 ℃时，冰含量从 53.8% 增加到 89.7%，这是因为更多的孔隙水（特别是小孔隙中的水）被冻结。在水冰相变过程中，理论上冰的体积会膨胀 9%，这也是导致岩石强度增加或者减小的原因，这主要取决于岩石初始的饱和度（即水体积与孔隙体积之比）。根据 İnce 等[34]以及 Shen 等[35]的研究结果，理论上这一临界初始饱和度为 91%，也就是说只有当岩石初始饱和度达到 91% 时才会导致岩石诱发冻胀损伤。然而，由本研究的试验结果可知，饱和试样在 -30 ℃温度下表现出最大动态压缩强度，而此温度下冰含量仅为 79.3%，故当冰含量小于 79.3% 时，水、冰相变作用使岩石更加致密坚硬，从而使其强度增大。超过这一临界冰含量，如 -40 ℃时冰含量为 85.9%、-50 ℃时冰含量为 89.7%，岩石将在冻胀作用下将发生不可逆损伤，形成新的裂纹。除此之外，负温下矿物颗粒的不均匀收缩也对新生微裂纹的产生和扩展有较大作用，从而导致岩石强度以及弹性模量的劣化。这些机制可解释温度 -40 ℃ ~ -50 ℃区间内岩石强度和弹模均下降这一现象。

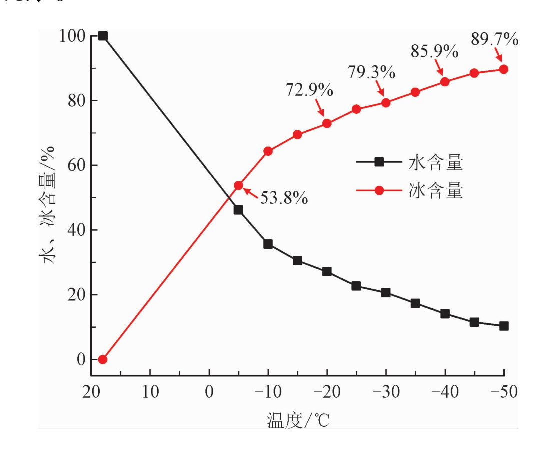


图 10　冻结岩石内部水含量和冰含量随温度的变化

Fig. 10　Variations in the water and ice contents against the ambient sub-zero temperature

3 冻结粉砂岩的动态本构模型

3.1 本构模型的推导过程

朱兆详、王礼立和唐志平教授对工程塑料开展了不同应变率范围($10^{-4} \sim 10^3\ s^{-1}$)的力学试验,提出了能较好描述材料动力学特性的非线性黏弹性本构模型,又称朱-王-唐(Z-W-T)本构模型[36],该模型由一个非线性弹性体、一个低频 Maxwell 体和一个高频 Maxwell 体组成,其模型关系表达式为

$$\sigma = f(\varepsilon) + \varphi(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \tag{6}$$

式中:$f(\varepsilon)$项为应变的函数,用于描述非线性弹性响应特征;$\varphi(\varepsilon,\dot{\varepsilon})$项为应变和应变率的函数,用于描述材料的非线性响应特征。

本研究所开展的动力冲击试验加载应变率在 $60 \sim 230\ s^{-1}$范围内,应变率较高,因此低频 Maxwell 体无足够的时间发生松弛,出于简便考虑可将低频 Maxwell 体退化成弹性常数为 E_1 的弹簧,如图 11 所示。

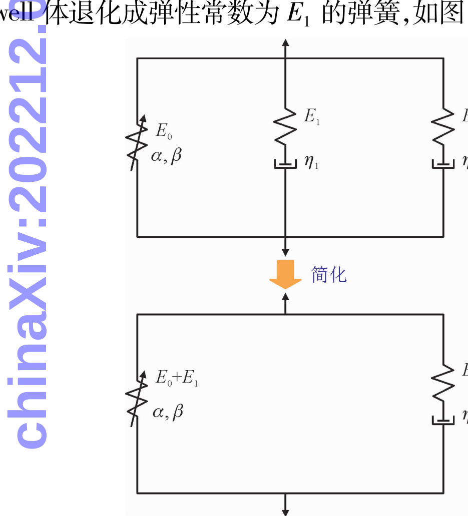


图 11 简化的 Z-W-T 本构模型

Fig. 11 Simplified Z-W-T constitutive model

由于 Z-W-T 模型本身并未考虑岩石在受载过程中的损伤演化过程,而冻结岩石的内部损伤是随动力加载过程不断演化加剧的,因此需要在上述 Z-W-T 模型中引入损伤变量,以更好地描述应变软化特征。引入损伤变量后,简化的 Z-W-T 本构模型可表达为

$$\sigma = (1-D)\cdot \left[(E_0+E_1)\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_2\int_0^t \dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right)d\tau\right] \tag{7}$$

假定冻结岩石内部的损伤演化服从 Weibull 分布,其损伤变量的表达式为

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{th}^*}\right)^n\right] \tag{8}$$

式中,ε_{th}^* 为损伤发生时的应变阈值,可由图 5 中动态弹性模量、塑性应变及 B 点对应的应力来确定。为体现温度对冻结岩石力学性能的影响,在本构模型中引入无量纲的温度项 T^*,即

$$T^* = \left(\left|\frac{T-T_r}{T_r}\right|\right)^m \tag{9}$$

式中:m 为温度系数;T_r 为参考温度,通过前述研究发现冻结岩石力学性能发生转折变化的温度为 −30 ℃,故参考温度设为 −30 ℃。

将式(8)和式(9)代入式(7),可得

$$\sigma = \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{th}^*}\right)^n\right]\left[(E_0+E_1)\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_2\int_0^t \dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right)d\tau\right]\cdot\left(\left|\frac{T-T_r}{T_r}\right|\right)^m \tag{10}$$

恒应变率条件下,式(10)可简化为

$$\sigma = \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{th}^*}\right)^n\right]\left\{(E_0+E_1)\varepsilon + \alpha\varepsilon^2 + \beta\varepsilon^3 + E_2\theta_2\dot{\varepsilon}\left[1-\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}\theta_2}\right)\right]\right\}\cdot\left(\left|\frac{T-T_r}{T_r}\right|\right)^m \tag{11}$$

式(11)即为动力加载下冻结岩石的非线性黏弹性动态本构模型。

3.2 本构模型参数的确定及其验证

从式(11)可知,该模型共包含 8 个参数,确定方法如下:首先,根据不同冻结温度和应变率条件下的动态应力应变曲线,计算得到应变率大小 $\dot{\varepsilon}$ 值,动态弹性模量 E_d 值,据此确定公式中(E_0+E_1)项的值,再根据动态应力应变曲线得到的动态弹性模量以及线弹性段 B 点对应的应力值,计算得到冻结岩石发生应变软化时的应变值作为损伤应变阈值 ε_{th}^*;然后,根据相同测试条件两个试样的应力应变曲线相减,可以得到 E_2 和 θ_2 值的取值范围;参数 α、β 决定了应力应变曲线峰后段的斜率;参数 n 和温度系数 m 可自定义曲线拟合得到。通过拟合后发现,不同温度条件下拟合参数 E_2、θ_2、α、β、n、m 不随温度的变化而变化(表 3),而(E_0+E_1)以及 ε_{th}^* 是与温度相关的参数。对不同冻结温度下的饱水岩石在应变率 $150\ s^{-1}$ 条件下的试验曲线进行拟合,得到拟合参数见表 4。

将 $150\ s^{-1}$ 应变率下饱水粉砂岩试样的试验应力应变曲线与本构模型曲线进行对比,结果如图 12。图 13 给出了本构模型和室内试验得到的岩石

主要参数如峰值应力、峰值应变和动弹模等参数的对比结果。由图 12 和图 13 可知，150 s^{-1} 应变率加载条件下，冻结岩石的动态本构模型曲线与试验结果比较吻合，特别是在峰值强度前、后段的变化趋势基本相同，结果表明该模型能较好地描述冻结岩石的应变率效应和温度效应。

表 3　模型中与应变率、温度无关的拟合参数

Tab. 3　Fitting parameters unrelated to temperature and strain rate

E_2/MPa	θ_2/s	α/MPa	β/MPa	n	m
15 800	1.2×10^{-6}	−3 000	-2.5×10^{6}	2	0.03

表 4　模型中与应变率、温度相关的拟合参数（应变率 150 s^{-1}）

Tab. 4　Fitting parameters related to temperature and strain rate (strain rate = 150 s^{-1})

冻结温度/℃	ε_{th}^{*}	(E_0+E_1)/MPa
−10	0.007 4	13 900
−20	0.006 6	17 000
−30	0.008 4	14 000
−40	0.000 9	10 400

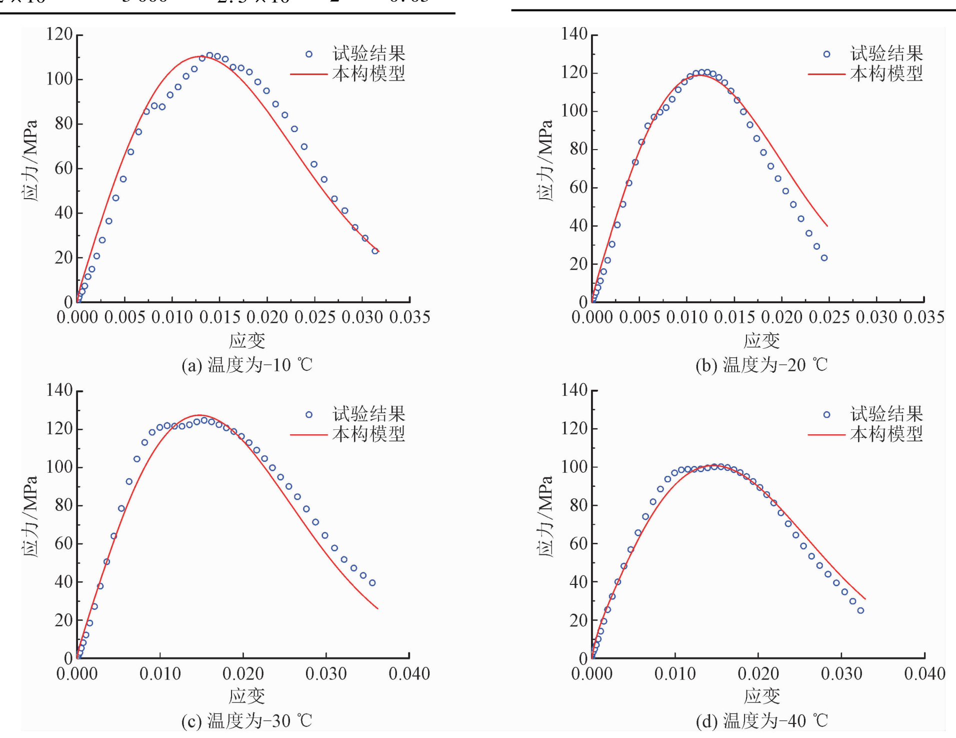


图 12　不同温度下冻结饱水粉砂岩的试验曲线与本构模型曲线对比（应变率 150 s^{-1}）

Fig. 12　Comparison of the stress-strain curves obtained by experiments and theoretical model for the saturated specimens at varying temperatures (strain rate = 150 s^{-1})

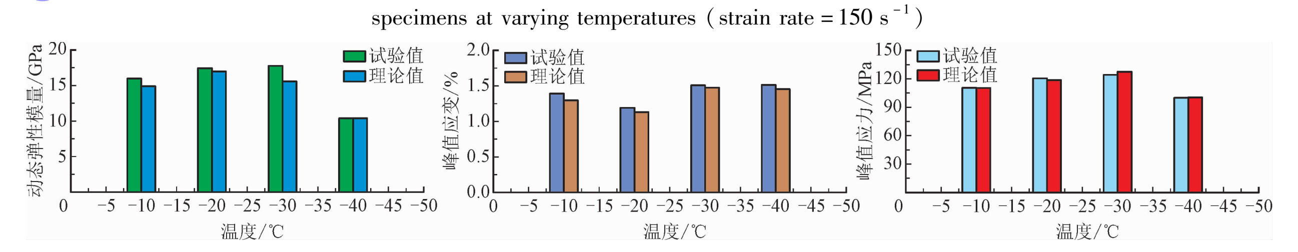


图 13　室内试验与本构模型获得的主要岩石力学性能参数对比

Fig. 13　Comparison of the basic properties of the specimens obtained by laboratory experiments and theoretical constitutive model

进一步地，图 14 给出了 −20 ℃下饱水粉砂岩的本构模型曲线和试验曲线对比结果。从图 14 中可以看到，当应变率为 69.6 s^{-1} 时，本研究提出的本构模型不能很好地反映峰后段回弹性质；当应变率为 127.3 s^{-1} 时，本构模型对于峰后软化阶段的拟合效果不佳。然而，当应变率较高，如应变率为 152.9 s^{-1}、191.5 s^{-1}、231.6 s^{-1} 时，利用本研究本构模型可以很好地描述岩石峰后软化特性。拟合结果表明，动力冲击作用下未完全破坏的冻结岩石试样，即较低应变率下（如 −20 ℃冻结粉砂岩，加载应变率为 69.6 s^{-1}），

采用本研究本构模型虽能较好拟合峰前阶段的应力应变关系,但无法真实反映峰后动力回弹的性质。高应变率加载下,冻结岩石发生充分破坏,采用本研究本构模型可以较好反映试样的峰前、峰后全阶段的应力应变响应特征。

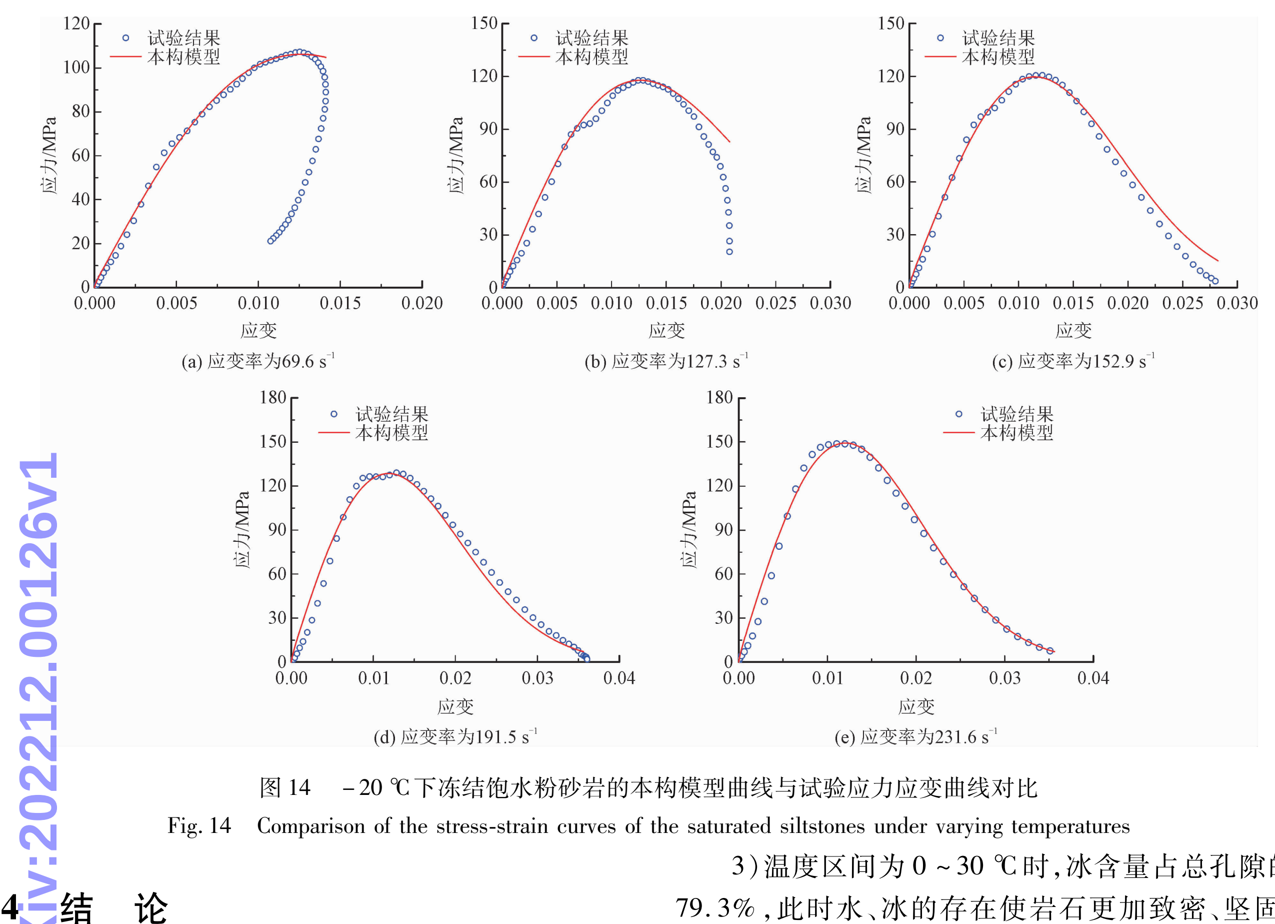


图 14 −20 ℃下冻结饱水粉砂岩的本构模型曲线与试验应力应变曲线对比

Fig. 14 Comparison of the stress-strain curves of the saturated siltstones under varying temperatures

4 结 论

对不同负温下和应变率下的饱水粉砂岩试样进行了 SHPB 动力冲击试验,考虑了 6 种温度条件(室温 18 ℃、−10 ℃、−20 ℃、−30 ℃、−40 ℃ 和 −50 ℃以及 5 种应变率条件(60 ~ −230 s^{-1})。深入分析了低温和应变率对饱水粉砂岩变形特征、动态压缩强度、动态弹性模量的影响规律,探讨了低温冻结岩石内部水、冰共存弱化与强化机理,构建了考虑应变率及冻结温度因素的岩石动态本构模型。得到以下主要结论。

1)裂纹闭合应变随着应变率的增加而增大,而弹性应变和塑性应变随应变率没有明显变化规律。各温度工况下,试样的动态弹性模量和动态压缩强度随着应变率的增大呈单调增加趋势。

2)试样的动态弹性模量和动态压缩强度在 18 ℃下降到 −30 ℃范围内先增大,在 −30 ℃下降到 −50 ℃范围内则明显减小。当温度为 −30 ℃时,试样表现出最大的动态弹性模量和动态压缩强度。

3)温度区间为 0 ~ 30 ℃时,冰含量占总孔隙的 79.3%,此时水、冰的存在使岩石更加致密、坚固。当温度下降到 −40 ℃和 −50 ℃时,冰含量分别达到了 85.9% 和 89.7%,此时冰的膨胀起主导作用进而导致冻结岩石产生新生裂纹。

4)通过引入损伤变量演化方程反映冻结粉砂岩的动态损伤破坏过程,引入温度系数项考虑了不同冻结温度的影响,构建了冻结粉砂岩的动态本构模型。结果表明高应变率下(大于 150 s^{-1}时),提出的动态本构模型可较好表征冻结粉砂岩全阶段应力应变响应特征。

参考文献:

[1] INADA Y, YOKOTA K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1984, 21(3): 145-153.

[2] AOKI K, HIBIYA K, YOSHIDA T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures[J]. Tunnelling and underground space technology, 1990, 5(4): 319-325.

[3] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of some thermo-me-

chanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature condition[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2001,38(7):1029-1034.

[4] DWIVEDI R D,SONI A K,GOEL R K,et al. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2000,37(8):1267-1275.

[5] 徐光苗,刘泉声,彭万巍,等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2502-2508.
XU Guangmiao,LIU Quansheng,PENG Wanwei,et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2006,25(12):2502-2508(in Chinese).

[6] 唐明明,王芝银,孙毅力,等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):787-794.
TANG Mingming,WANG Zhiyin,SUN Yili,et al. Experimental study of mechanical properties of granite under low temperature[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2010,29(4):787-794(in Chinese).

[7] 奚家米,杨更社,庞磊,等. 低温冻结作用下砂质泥岩基本力学特性试验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(7):1262-1268.
XI Jiami,YANG Gengshe,PANG Lei,et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of sandy mudstone under low freezing temperature[J]. Journal of China coal society,2014,39(7):1262-1268(in Chinese).

[8] 单仁亮,杨昊,郭志明,等. 负温饱水红砂岩三轴压缩强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊 2):3657-3664.
SHAN Renliang,YANG Hao,GUO Zhiming,et al. Experimental study of strength characters of saturated red sandstone on negative temperature under triaxial compression[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2014,33(S2):3657-3664(in Chinese).

[9] CHEN T C,YEUNG M R,MORI N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action[J]. Cold regions science and technology,2004,38(2/3):127-136.

[10] HUANG S B,LIU Q S,CHENG A P,et al. A statistical damage constitutive model under freeze-thaw and loading for rock and its engineering application[J]. Cold regions science and technology,2018,145:142-150.

[11] KURILKO A S,NOVOPASHIN M D. Features of low temperature effect upon strength of enclosing rock and kimberlite in the “Udachnaya” pipe[J]. Journal of mining science,2005,41(2):119-122.

[12] ZAKHAROV E V,KURILKO A S. Effects of low temperatures on strength and power input into rock failure[J]. Sciences in cold and arid regions,2014,6(5):455-460.

[13] 黄中伟,位江巍,李根生,等. 液氮冻结对岩石抗拉及抗压强度影响试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(3):694-700.
HUANG Zhongwei,WEI Jiangwei,LI Gensheng,et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and soil mechanics,2016,37(3):694-700.

[14] 杨更社,吕晓涛. 富水基岩井筒冻结壁砂质泥岩力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(4):492-496.
YANG Gengshe,LÜ Xiaotao. Experimental study on the sandy mudstone mechanical properties of shaft sidewalls under the frozen conditions[J]. Journal of mining & safety engineering,2012,29(4):492-496(in Chinese).

[15] 席新林. 低温冻结状态下岩石的变形特性及力学行为研究[J]. 兰州理工大学学报,2022,48(2):21-27.
XI Xinlin. Study on deformation characteristics and mechanical behavior of rock under low temperature freezing state[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2022,48(2):21-27(in Chinese).

[16] ZHANG Q B,ZHAO J. Determination of mechanical properties and full-field strain measurements of rock material under dynamic loads[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2013,60:423-439.

[17] ZHANG Q B,ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock mechanics and rock engineering,2014,47(4):1411-1478.

[18] WANG S F,LI X B,DU K,et al. Experimental study of the triaxial strength properties of hollow cylindrical granite specimens under coupled external and internal confining stresses[J]. Rock mechanics and rock engineering,2018,51(7):2015-2031.

[19] YANG R S,FANG S Z,LI W Y,et al. Experimental study on the dynamic properties of three types of rock at negative temperature[J]. Geotechnical and geological engineering,2019,37(1):455-464.

[20] 杨阳,李祥龙,杨仁树,等. 低温岩石冲击破碎分形特征与断口形貌分析[J]. 北京理工大学学报,2020,40(6):632-639.
YANG Yang,LI Xianglong,YANG Renshu,et al. Study on fractal characteristics and fracture mechanism of frozen rocks[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2020,40(6):632-639(in Chinese).

[21] 赵涛. 冻结裂隙岩体力学特性及冲击动力学响应研究[D]. 西安:西安科技大学,2021.

[22] 谢理想,赵光明,孟祥瑞. 岩石在冲击载荷下的过应力本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊 1):2772-2781.
XIE Lixiang,ZHAO Guangming,MENG Xiangrui. Research on excess stress constitutive model of rock under impact load[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2013,32(S1):2772-2781(in Chinese).

[23] 王春,唐礼忠,程露萍,等. 三维高静载频繁动态扰动时岩石损伤特性及本构模型[J]. 岩土力学,2017,38(8):2286-2296.
WANG Chun,TANG Lizhong,CHENG Luping,et al. Damage characteristics and constitutive model of rock under three-dimensional high static load and frequent dynamic disturbance[J]. Rock and soil mechanics,2017,38(8):2286-2296(in Chinese).

（下转第 1134 页）

[19] 袁建滨. 粘土中结合水特性及其测试方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[20] 刘月妙,陈璋如. 内蒙古高庙子膨润土作为高放废物处置库回填材料的可行性[J]. 矿物学报,2001,21(3):541-543.
LIU Yuemiao, CHEN Zhangru. The feasibility of using Bentonite from Gaomiaozi in Inner Mongolia as backfill material for high-level radioactive waste repository[J]. Actamineralogica Sinica,2001,21(3):541-543(in Chinese).

[21] 叶为民,赖小玲,刘毅,等. 高庙子膨润土微观结构时效性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):2255-2261.
YE Weimin, LAI Xiaoling, LIU Yi, et al. Experimental study on ageing effects on microstructure of unsaturated GMZ01 Bentonite [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2013,35(12):2255-2261(in Chinese).

[22] 秦冰,陈正汉,刘月妙. 高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(5):756-763.
QIN Bing, CHEN Zhenghan, LIU Yuemiao. Research onthree-dimensional expansion force characteristics of Gaomiaozi Bentonite GMZ001[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2009,31(5):756-763(in Chinese).

[23] YE W M, CUI Y J, QIAN L X, et al. An experimental study of the water transfer through confined compacted GMZ bentonite[J]. Engineering geology,2009,108(3/4):169-176.

[24] 潘倩. 土-膨润土竖向隔离墙力学行为及其对防污性能影响[D]. 杭州:浙江大学,2016.

[25] 彭磊,李晓月,杜守继,等. 高庙子钠基膨润土纳米孔隙结构的同步辐射小角散射[J]. 硅酸盐学报,2019,47(10):1458-1466.
PENG Lei, LI Xiaoyue, DU Jishou, et al. Synchrotronradiation small-angle scattering of Nano-pore structure of Gaomiaozi Na-based Bentonite[J]. Journal of the Chinese ceramic society,2019,47(10):1458-1466(in Chinese).

[26] 廖义玲,毕庆涛,席先武,等. 关于红黏土先期固结压力的探讨[J]. 岩土力学,2006,27(11):1931-1934.
LIAO Yiling, BI Qingtao, XI Xianwu, et al. Discussion on the preliminary consolidation pressure of red clay[J]. Rock and soil mechanics,2006,27(11):1931-1934(in Chinese).

[27] 朱建群,易亮,龚琰,等. 贵州红黏土的胀缩性与水敏性研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(4):35-39.
ZHU Jianqun, YI Liang, GONG Yan, et al. Study on the expansion and shrinkage and water sensitivity of Guizhou red clay[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(natural science edition),2016,31(4):35-39(in Chinese).

(编辑 史淑英)

(上接第 1107 页)

[24] 刘志杰,朱志武,谢东海,等. 基于线性黏弹性模型的冻土动态本构关系[J]. 西南科技大学学报,2015,30(4):85-88.
LIU Zhijie, ZHU Zhiwu, XIE Donghai, et al. Dynamic constitutive relation of frozen soil based on liner viscoelastic model[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology,2015,30(4):85-88(in Chinese).

[25] 马冬冬. 动静组合加载下人工冻土动态力学特性及本构模型研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.

[26] 单仁亮,宋永威,宋立伟,等. 西北人工冻结红砂岩的动态时效损伤模型[J]. 煤炭学报,2018,43(1):118-123.
SHAN Renliang, SONG Yongwei, SONG Liwei, et al. Time dependent damage model of northwest artificial frozen red sandstone under dynamic loading[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):118-123(in Chinese).

[27] LI X B, ZOU Y, ZHOU Z L. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method[J]. Rock mechanics and rock engineering,2014,47(5):1693-1709.

[28] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2004,41(8):1413-1426.

[29] ASHWORTH E N, ABELES F B. Freezing behavior of water in small pores and the possible role in the freezing of plant tissues [J]. Plant physiology,1984,76(1):201-204.

[30] KOZLOWSKI T. A simple method of obtaining the soil freezing point depression, the unfrozen water content and the pore size distribution curves from the DSC peak maximum temperature[J]. Cold regions science and technology,2016,122:18-25.

[31] TIAN H H, WEI C F, LAI Y M, et al. Quantification of water content during freeze-thaw cycles: A nuclear magnetic resonance based method[J]. Vadose zone journal,2018,17(1):1-12.

[32] TANG Z Q, ZHAI C, ZOU Q L, et al. Changes to coal pores and fracture development by ultrasonic wave excitation using nuclear magnetic resonance[J]. Fuel,2016,186:571-578.

[33] WENG L, WU Z J, LI X B. Mesodamage characteristics of rock with a pre-cut opening under combined static-dynamic loads: A nuclear magnetic resonance (NMR) investigation[J]. Rock mechanics and rock engineering,2018,51(8):2339-2354.

[34] ÍNCE Í, FENER M. A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated pyroclastic rocks due to freeze-thaw cycle [J]. Journal of African earth sciences,2016,120:134-140.

[35] SHEN Y J, WANG Y Z, ZHAO X D, et al. The influence of temperature and moisture content on sandstone thermal conductivity from a case using the artificial ground freezing(AGF) method[J]. Cold regions science and technology,2018,155:149-160.

[36] 王礼立, PLUVINAGE G, LABIBES K. 冲击载荷下高聚物动态本构关系对粘弹性波传播特性的影响[J]. 宁波大学学报,1995,8(3):30-57.
WANG Lili, PLUVINAGE G, LABIBES K. The influence of dynamic constitutive relations of polymers at impact loading on the viscoelastic wave propagation character[J]. Journal of Ningbo University,1995,8(3):30-57(in Chinese).

(编辑 张璐)